BETOCIB

RÉPARATIONS DES BÉTONS À BASE DE CIMENT BLANC

Annexe aux

Prescriptions techniques

Septembre 2003



7, place de la Défense - La Défense 4
92974 PARIS LA DÉFENSE CEDEX
Tél. : 01 55 23 01 15 - Fax : 01 55 23 01 16
www.infociments.fr

SOMMAIRE

PREAMBULE

Comme tous les autres matériaux, le béton nécessite protection, entretien, voire réparation. La commission technique de BETOCIB a donc jugé indispensable de compléter l'annexe *Protection et entretien des bétons à base de ciment blanc* par celle-ci, dédiée aux *Réparations*.

Il existe trois principales cause de dégradations des bétons, les dégradations dues à l'usage, les dégradations dues au temps (essentiellement des éclatements du béton provoqués par la corrosion des armures) et les dégradations accidentelles (chocs, incendie, ...). Les raisons de réparer un ouvrage en béton sont diverses : enrayer les phénomènes de dégradation, remettre en état le parement du béton, éviter l'apparition de nouveaux désordres et assurer une bonne durabilité, tout en préservant l'esthétique.

La rédaction de ce guide – qui n'est pas exhaustif – est articulée autour de deux chapitres :

- l'observation et le diagnostic des dégradations courantes ;
- la méthodologie de réparation.

Ce document tient compte de l'expérience des industriels spécialisés dans les produits de réparation des bétons, des travaux du Centre d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP), du Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB) et du Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH). Qu'ils soient remerciés de leur collaboration.

1 OBSERVATION ET DIAGNOSTIC DES DEGRADATIONS COURANTES

Suite à l'observation de dégradations constatées lors de la visite des ouvrages, conformément à la norme NF P 95-101, il convient de prévoir un diagnostic d'évolution sur l'état de la structure et des matériaux. C'est un préalable indispensable à toute opération de réhabilitation. Ce diagnostic a pour but d'identifier la pathologie, d'évaluer son ampleur et d'en déterminer les causes.

Il appartient au maître d'œuvre de définir les moyens adaptés pour réaliser ce diagnostic : observations visuelles, mesures *in situ*, analyses en laboratoire, simulation de vieillissement, etc.

Ce diagnostic approfondi permet de définir les réparations à exécuter (méthodes, famille de produits à utiliser, conditions d'application, ampleur de la préparation du support, etc.) et les traitements complémentaires à envisager.

Les laboratoires spécialisés (CEBTP, LRMH...) vous aideront à réaliser ce diagnostic et définiront les réparations adaptées à l'ouvrage.

Les dégradations courantes sont répertoriées dans les tableaux ci-après.

1.1 Tableau des pathologies

1.1.1 Pathologies existant à l'origine

CONSTAT	DESCRIPTION	ORIGINES	ÉVOLUTION
Bullage	Présence de cavités à la surface du béton, d'une profondeur inférieure à 5 mm.	▪ Formulation inadaptée du béton. ▪ Mise en œuvre inadaptée.	Risque d'encrassement.
Nids de cailloux	Accumulation localisée de gravillons.	▪ Formulation inadaptée du béton. ▪ Mise en œuvre inadaptée.	Fragilisation vis-à-vis des agressions extérieures. Accentuation des risques de corrosion.
Spectre des armatures	Dessin visible des armatures (fantômes).	▪ Ségrégation du béton dans le prolongement des armatures ▪ Mise en vibration de l'armature par l'aiguille vibrante lors de la mise en place du béton.	Aucune évolution si l'enrobage est conforme.

1.1.2 Pathologies apparaissant dans le temps

CONSTAT	DESCRIPTION	ORIGINES	ÉVOLUTION
Aspect grenu	Érosion locale de la laitance.	▪ Environnement urbain, marin. ▪ Pluies, embruns. ▪ Action du vent.	Perte progressive de l'aspect d'origine conduisant à une augmentation de la porosité en surface, avec apparition progressive des granulats.
Écaillage	Peau du béton se décollant sous forme d'écailles.	▪ Corrosion des armatures. ▪ Gel en présence de sel de déverglaçage en surface. ▪ Attaques sulfatiques (gypse, eau de mer…). ▪ Alcali-réaction. ▪ Présence de pyrites.	Épaufrures, éclatement du béton.
Épaufrures ou éclatements localisés	Fragments détachés de la masse du béton.	▪ Corrosion des armatures. ▪ Chocs. ▪ Gel/dégel. ▪ Evolution possible d'un écaillage.	Extension possible des désordres.

1.1.2 Pathologies apparaissant dans le temps *(suite)*

CONSTAT	DESCRIPTION	ORIGINES	ÉVOLUTION
Fissures	Fentes de largeur et de profondeur variables (hors fissures d'origine structurelle ≤ 3/10e de mm).	▪ Corrosion des armatures. ▪ Problèmes structurels (ex. : sous-dimensionnement, chocs). ▪ Retrait, dilatation. ▪ Attaques sulfatiques (gypse, eau de mer…). ▪ Alcali-réaction. ▪ Gel/dégel. ▪ Fissures de reprise de bétonnage.	Amplification en fonction de l'environnement atmosphérique et de l'utilisation.
Concrétions	Cristallisations indurées massives.	▪ Circulation d'eau au travers du béton.	Lixiviation du béton (effet dégradant provoqué par la dissolution de la chaux du béton).
Salissures	Taches et coulures.	▪ Environnement. ▪ Pluies, embruns. ▪ Action du vent. ▪ Orientation du bâtiment. ▪ Conception du bâtiment.	Perte progressive de l'aspect d'origine conduisant, dans certains cas, à la dégradation du parement.

1.1.3 Pathologies existant à l'origine ou apparaissant dans le temps

CONSTAT	DESCRIPTION	ORIGINES	ÉVOLUTION
Faïençage	Maillage de fissures fines et superficielles.	● Dessiccation précoce du béton par temps chaud (et absence de cure).	Fissuration non évolutive. Inconvénient esthétique.
Efflorescences	Cristallisations le plus souvent blanchâtres à la surface du béton.	▪ Remontée d'eau localisée chargée en chaux à la surface du béton	L'évolution : ● est fonction de l'hygrométrie ambiante. ● décroît dans le temps.
		● Nitrates (engrais).	Dégradation éventuelle du béton.
		● Apport de sels solubles provenant de l'environnement (sulfates, chlorures).	Dégradation du béton et des armatures.

1.2 Bullage

Le bullage n'altère pas la résistance mécanique du béton mais il pose un problème d'ordre esthétique.

Actions préventives

Pour éviter ce désordre, il convient d'apporter une attention particulière à la formulation du béton, voire d'utiliser un béton autoplaçant et surtout un agent de décoffrage (huile, cire, émulsion) adapté au moule et au béton. La mise en œuvre doit être soignée et respecter les règles de l'art.

1.3 Nids de cailloux

La formation des nids de cailloux provient essentiellement de la ségrégation du béton (manque de fines, mauvaise consistance, rapport gravillons/sable inadapté).

Le phénomène est amplifié par d'autres paramètres liés à une mise en œuvre insuffisamment soignée : par exemple lors d'une vibration trop longue et mal adaptée, ou dans le cas de coulage *in situ*, d'une hauteur de chute trop importante.

Actions préventives

- Pour éviter la ségrégation, il convient d'étudier soigneusement la formulation et d'éviter les excès d'eau.
- Utiliser des coffrages étanches pour éviter toute fuite de laitance.
- Veiller à la position et à la densité des aciers.

1.4 Fissures

Classification des fissures selon leur ouverture

Microfissure : fente très fine dont l'ouverture est inférieure à 0,2 mm.

Faïençage : réseau de microfissures se présentant sous forme d'un dessin géométrique à mailles irrégulières ; il n'intéresse le plus souvent que la couche superficielle du béton.

Fissure : fente dont l'ouverture est comprise entre 0,2 mm et 2 mm.

Lézarde ou crevasse : fente dont l'ouverture est supérieure à 2 mm.

1.4.1 Faïençage et fissuration superficielle (non évolutifs)

Ces phénomènes se manifestent par un réseau de fines ouvertures qui n'intéresse que la couche superficielle de laitance du béton brut. Naturels mais inesthétiques, ils ne nuisent pas à la durabilité des éléments.

Actions préventives :

- Pour éviter ces fissures, il suffit de maintenir humide la surface du béton les premiers jours ou d'utiliser un produit de cure.

1.4.2 Fissures passives (non évolutives)

Fissures dont l'ouverture ne varie plus de façon sensible dans le temps, quelles que soient les conditions de température ou de sollicitations de l'ouvrage.

Actions préventives :

- Pour éviter ces fissures, une armature en treillis soudé est à disposer dans le béton de parement.

1.4.3 Fissures actives (évolutives)

Fissures dont l'ouverture varie dans le temps en fonction de gradients thermiques ou hygrométriques, ou des sollicitations de l'ouvrage. Elles peuvent être dues à l'une des causes suivantes :

Fissures dues à la corrosion des armatures

Les armatures enrobées de béton sont naturellement protégées de la corrosion par un phénomène de passivation s'opérant lors de l'hydratation du ciment (création d'un environnement basique important – pH 13 environ). Ce milieu basique risque toutefois de se transformer dans le temps du fait de :

1. la carbonatation lente de la couche protectrice due au gaz carbonique de l'air ;
2. la diffusion d'ions chlorure (milieu marin, sels de déverglaçage, etc.) ;
3. l'emploi d'adjuvants chlorés (limite acceptable de chlore : 0,4 % du poids de ciment pour le béton armé ; 0,1 % à 0,2 % pour le béton précontraint).

En règle générale, les enrobages préconisés (au minimum 3 cm pour les parois exposées aux intempéries et en milieu peu agressif ; 5 cm en bord de mer) sont suffisants pour garantir cette protection naturelle durant la durée de vie escomptée de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage ou des bétons mal vibrés, de ce fait trop poreux, risquent de conduire à la dégradation prématurée de l'armature (rouille qui se caractérise par un oxyde expansif conduisant à un éclatement localisé ou à une fissuration de l'enrobage le long de l'armature).

- Les règlements suivants fixent des minima d'enrobage :
  - les règles de calcul du béton armé aux états limites (BAEL – voir tableau ci-dessous) ;
  - la norme NF P 10-210 (DTU 22.1) concernant les murs extérieurs en panneaux préfabriqués de grandes dimensions ;
  - la NF P 18-210 (DTU 23.1) concernant les murs en béton banché ;
  - la norme NF P 18-201 (DTU 21) – Exécution des travaux en béton.
- Pour les parements en béton de ciment blanc, BETOCIB préconise un enrobage égal à deux fois le diamètre des plus gros granulats et au minimum de 4 cm en ambiance normale et 5 cm en ambiance agressive (maritime...).

Règles BAEL – Enrobages des armatures

L'enrobage de toute armature est au moins égal à :

- 5 cm pour les ouvrages à la mer ou exposés aux embruns ou aux brouillards salins ainsi que pour les ouvrages exposés à des atmosphères très agressives.

  COMMENTAIRE : cet enrobage de 5 cm peut être réduit à 3 cm si soit les armatures, soit le béton sont protégés par un procédé dont l'efficacité a été démontrée.

- 3 cm pour les parois coffrées ou non qui sont soumises (ou sont susceptibles de l'être) à des actions agressives, ou à des intempéries, ou des condensations, ou encore, eu égard à la destination des ouvrages, au contact d'un liquide.

  COMMENTAIRE : la valeur de 3 cm peut être ramenée à 2 cm lorsque le béton présente une résistance caractéristique supérieure à 40 MPa. En effet, l'efficacité de la protection apportée par l'enrobage est fonction de la compacité du béton, laquelle croît avec sa résistance.

- 1 cm pour des parois qui seraient situées dans des locaux couverts et clos et qui ne seraient pas exposées aux condensations.

  COMMENTAIRE : pour assurer un bon enrobage et une bonne protection des armatures, le béton doit être d'autant plus dosé en ciment que les armatures sont plus nombreuses et plus divisées. Dans le cas de pièces moyennement ou fortement armées, les dosages usuels oscillent entre 350 kg et 400 kg de ciment par mètre cube de béton. On peut remarquer en outre que l'augmentation du dosage en ciment constitue un moyen d'augmenter la résistance du béton.

Fissures d'origine mécanique

Elles sont assez rares et résultent en général d'erreurs de conception ou d'exploitation des ouvrages.

Fissures d'origine thermique

Elles sont dues à la dilatation et à la contraction du béton sous l'effet respectivement de la chaleur et du froid.

Actions préventives :

- Étudier soigneusement la disposition des joints et des armatures ainsi que les problèmes liés à la transmission de chaleur tels que l'ensoleillement, les ponts thermiques, etc.

Fissures dues à l'alcali-réaction et aux attaques sulfatiques

Il s'agit d'une dégradation interne due au gonflement du béton, se manifestant par une fissuration profonde en réseau.

Les phénomènes d'alcali-réaction sont le résultat d'une réaction chimique complexe se développant entre certains types de granulats contenant des formes de silice réactive et les alcalins du béton, en présence d'humidité. Ils s'accompagnent de la formation de gels silico-calco-alcalins expansifs.

La grande majorité des désordres observés sur les bétons en contact avec les sols ou les eaux de ruissellement sont dus à la présence de sulfates. Ils réagissent avec les aluminates de calcium des ciments et conduisent à la formation d'ettringite expansive.

Actions préventives :

Prévoir des matériaux conformes aux normes et recommandations en vigueur :

- LCPC : Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (juin 1994)
- Setra : Guide pour la rédaction des pièces écrites des marchés – Prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (juin 1996).
- FDP 18-542. Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques – Critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction (mai 1994) (fascicule de documentation).
- NF P 15-317 (septembre 1995) – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
- XP P 15-319 (septembre 1995) – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à hautes teneurs en sulfates
- Afnor. Liste périodique des carrières ayant des produits certifiés NF (voir site Afnor rubrique certification).
- FDP 18-011 (juin 1992) – Bétons – Classification des environnements agressifs (fascicule de documentation).

Fissures dues aux cycles gel/dégel

La transformation en glace de l'eau contenue dans le béton s'accompagne d'une expansion de 9 % en volume qui crée ainsi, à l'intérieur de celui-ci, des contraintes internes très importantes conduisant à la formation de fissures.

Actions préventives

- Le moyen de pallier l'apparition de tels désordres consiste, par exemple, en l'introduction dans le béton frais, lors du malaxage, d'un entraîneur d'air provoquant la création d'un réseau de bulles d'air uniformément réparties dans la masse qui se comportent comme des vases d'expansion lors de la transformation de l'eau en glace.

Des vérifications au gel peuvent être effectuées par essais selon les indications suivantes :

Classe d'exposition	Norme relative à l'essai proposé
Gel faible : moins de 2 jours/an avec température inférieure à 5 °C.	P 18-425
Gel sévère : plus de 10 jours/an avec température inférieure à 10 °C.	P 18-424
Gel et sels de déverglaçage.	XP P 18-420

1.5 Efflorescences

Les efflorescences sont des dépôts de sels ou de cristaux, de teinte généralement claire, blanchâtre, qui apparaissent à la surface du béton.

Deux causes sont possibles :

1. **au moment de sa prise et de son durcissement, le ciment libère une certaine quantité de chaux : Ca $(OH)_2$.**

   Cette chaux est pour partie soluble dans l'eau.

   Le béton contient inévitablement plus d'eau que nécessaire à l'hydratation du ciment. Cette eau excédentaire tend à s'échapper de la masse du béton vers l'extérieur, d'autant plus vite que l'atmosphère est chaude et sèche.

   Cette eau chargée en chaux dissoute et en sels divers chemine vers la surface, puis s'évapore ; une réaction lente est provoquée au contact du gaz carbonique de l'air selon la formule :

   chaux hydratée et gaz carbonique donnent carbonate de calcium et vapeur d'eau

   $$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

   Ce carbonate de calcium insoluble se dépose en surface sous forme d'un voile blanchâtre.

   Les efflorescences calciques proviennent donc d'un phénomène naturel et ne sont pas dues à une pathologie du béton.

   Actions préventives

   - Optimiser la quantité d'eau de gâchage et la compacité du béton.
   - Respecter les conditions de cure et de stockage des produits.
   - Employer un hydrofuge de masse ou de surface.

2. **par apport de sels solubles (sulfates, nitrates, chlorures) provenant des engrais, sels de déverglaçage ou de pollutions diverses.**

1.6 Salissures

Voir *Annexe aux Prescriptions techniques – Protection et entretien des bétons à base de ciment blanc*, Betocib (2001).

2 METHODOLOGIE DE REPARATION

2.1 Études et investigations préliminaires

2.1.1 Établissement de l'historique de l'ouvrage

Il faut rechercher en particulier :

1. la provenance des bétons, leur composition, la date, la période de coulage du béton (été, hiver…) et les conditions de mise en œuvre. Préciser également les problèmes spécifiques rencontrés en fabrication tels qu'un mauvais positionnement des aciers, un dosage trop faible en ciment, un mélange mal vibré ;
2. les définitions des contraintes prévues par le calcul ;
3. les modifications de charges et de structures.

2.1.2 Évaluation des contraintes environnementales et d'exploitation

Il s'agit d'évaluer les contraintes environnementales actuelles et futures, notamment les facteurs physiques susceptibles de dégrader les bétons tels que chocs, abrasions, surcharges, feu, cycle gel/dégel, et chimiques (pollutions, environnements agressifs).

2.2 Diagnostic du processus de dégradation

Le diagnostic est l'étape préliminaire à toute réparation. Il a pour objet d'évaluer l'origine des désordres constatés ainsi que leur ampleur. Il permettra de définir les techniques de réparation à mettre en œuvre et d'évaluer financièrement l'ampleur des réparations à entreprendre. Il est souvent réalisé par des spécialistes et fait appel à une série d'analyse et d'observations sur chantier et également en laboratoire.

Le diagnostic fait appel aux examens suivants :

- examen visuel approfondi et sondage manuel au marteau ;
- essais effectués en laboratoire sur prélèvements réalisés *in situ* (éprouvettes, carottages) ;
- essais non destructifs réalisés *in situ* pour notamment identifier la présence d'agents agressifs dans le béton et préciser les causes des désordres constatés (origine mécanique ou chimique), ainsi que leur étendue (à préciser sur schémas, dessins, photos).

Il faut également vérifier l'état satisfaisant de la structure porteuse et des liaisons. *A contrario*, il est nécessaire de déterminer l'état mécanique de la construction et d'identifier les faiblesses de la structure, notamment des armatures.

Tableau 1 — Exemple de diagnostic pour déterminer la dégradation des armatures.

DIAGNOSTIC	METHODE
Inspections visuelles et photographiques	Réalisation de dessins précisant les dégradations. Photographies des désordres les plus représentatifs.
Mesure de l'enrobage	Emploi d'un pachomètre pour mesurer l'enrobage aux endroits dégradés et également sur l'ensemble de la surface à réparer.
Localisation des parties corrodées non visibles	Mesure de potentiel : cette méthode électrochimique permet d'établir une cartographie des zones pouvant présenter un risque de corrosion et d'évaluer l'importance des désordres.
Estimation de la vitesse de corrosion	Mesure par résistance de polarisation : cette méthode mesure la vitesse de corrosion des armatures et permet d'estimer la durabilité de la structure.
Évaluation de la profondeur de carbonatation	Test à la phénolphtaléine : il est réalisé sur une coupe fraîche du béton à l'aide d'un réactif chimique qui montre par coloration la profondeur de carbonatation.
Mesure de l'absorption d'eau en surface	Essai « à la pipe ».
Évaluation du dosage en chlorure, en sulfate	Par analyse physico-chimique.
Évaluation de la cohésion de la surface du béton	Essai d'adhérence sur pastilles collées à la surface du béton.

Ce diagnostic fait appel à un ensemble d'examens à effectuer ou non selon l'importance des dégâts constatés. Il permet de déterminer :

- l'origine de la corrosion :
  - enrobage insuffisant,
  - armatures situées dans une zone de béton carbonaté,
  - attaque par les ions chlorures ;
- l'importance de la corrosion et ses conséquences vis-à-vis de la durée de service de l'édifice.

Des examens complémentaires en laboratoires (voir tableau n° 2) peuvent être réalisés à partir de carottages ou de prélèvements sur le béton à diagnostiquer pour déterminer les principaux constituants du béton (analyses physico-chimiques permettant d'évaluer les dosages en ciment et en chlorure et la nature des granulats).

Tableau 2 — Exemple d'analyses chimiques applicables au béton.

RECHERCHES	ANALYSES
Dosage en liants	Analyse qualitative et quantitative du liant.
Nature des granulats.	Analyse pétrographique par microscope optique.
Composition minéralogique	Examen par diffraction des rayons X.
Composition minéralogique. Pathologies particulières.	Microscope électronique à balayage (MEB).
Porosité	Pesée hydrostatique. Porosimètre à mercure (distribution des pores). Microscopie optique par analyse d'images (microstructure du béton).
Alcali-réaction.	Méthode de test accéléré ou emploi de l'acétate d'uranyl.
Carbonatation	Test à la phénolphtaléine.

En cas de désordres importants, il est recommandé de procéder à une analyse physico-chimique du béton pour déterminer son état général (profondeur de carbonatation en particulier, alcali-réaction, teneur en ions chlorure, réaction sulfatique) et également rechercher sa composition initiale (ciment, granulats employés) afin de rechercher un produit de réparation approprié.

Tableau 3 — Principales méthodes d'analyses physico-chimiques.

- **Détermination qualitative et quantitative du ciment dans un béton à partir d'un prélèvement représentatif**

Il existe deux méthodes :

- La première consiste à doser la silice soluble du béton, celle qui est mise en solution au cours d'une attaque acide. En considérant que cette silice provient uniquement du liant et pas des granulats, on remonte au pourcentage de ciment en divisant la valeur trouvée par la teneur en silice soluble du ciment utilisé dans le béton.
- La deuxième méthode suit le même principe, en remplaçant la silice soluble par la fraction hydraulique, définie comme le complément à 100 % de la somme : insoluble + perte au feu + chaux carbonatée.

Le pourcentage de ciment est généralement exprimé comme la moyenne des valeurs obtenues par chacune de ces deux méthodes.

Parallèlement, on mesure la quantité d'eau liée dans le béton par différence de perte de poids entre 80 °C et 550 °C. Le rapport eau liée sur le pourcentage de ciment renseigne sur le degré d'hydratation du béton (sauf en présence de matières organiques).

En outre, sur l'échantillon de béton, on mesure par pesée hydrostatique sa densité apparente et sa porosité ouverte. La valeur de densité apparente permet d'exprimer le pourcentage de ciment déterminé précédemment en kg/m^3.

La porosité ouverte va renseigner sur le rapport eau/ciment du béton frais et sur la qualité de la mise en place.

- **Microscopie**

- Microscopie optique :
  Cette technique permet de réaliser des examens pétrographiques des bétons et des granulats, de détecter la présence de microfissurations, de faire des analyses granulométriques et des comptages de l'espacement de bulles d'air dans les bétons.
- Microscopie électronique à balayage (MEB) :
  Cette technique analytique permet l'observation de matériaux massifs à faible et fort grossissements. On peut ainsi visualiser la microstructure d'un matériau tout en conservant une grande profondeur de champ d'observation (aspect 3D des images), ce qui est impossible par microscopie optique traditionnelle. Cette technique utilise un faisceau d'électrons comme source lumineuse, un ensemble de lentilles électromagnétiques et système télévisuel pour la visualisation. Le microscope électronique est en général couplé à un analyseur de rayons X dont la fonction est d'identifier et de quantifier les rayonnements X émis par l'échantillon sous le bombardement électronique. Ainsi, l'identification des éléments chimiques qui constituent la matière observée, ainsi que leur dosage dans certaines conditions expérimentales, est possible.

- **Diffraction des rayons X**

Ce type d'analyse permet de déterminer qualitativement et parfois quantitativement la composition minéralogique d'un échantillon de matériau.

- **Fluorescence X**

Permet de réaliser des analyses élémentaires qualitatives et quantitatives (pourcentage de chaux, de silice, d'alumine…). Cette technique est complémentaire à la diffraction des rayons X.

- **Analyse thermique**

L'analyse thermique (AT) est un terme générique désignant des techniques qui permettent de suivre les propriétés physiques et/ou chimiques d'un matériau en fonction de la température ou du temps lorsque celui-ci est soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée.

Il existe trois techniques :

- L'analyse thermogravimétrique (ATG) mesurant les variations de masse d'un échantillon. Ces variations peuvent être une perte de masse (émission de vapeurs par l'échantillon) ou un gain de masse (fixation de gaz sur l'échantillon). Les applications sont très variées et concernent une multitude de catégories de produits (déshydratation, décomposition, pyrolyse, oxydation, réduction…).
- L'analyse thermodifférentielle (ATD) mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence (matériau inerte thermiquement). Avec cette méthode toute transformation de type endothermique (fusion, solidification, déshydratation…) ou de type exothermique (oxydation, décomposition…) est détectable pour toutes les catégories de matériaux.
- L'analyse calorimétrique différentielle (ACD ou DSC) mesurant les variations de flux thermique dans un échantillon. Lorsqu'un matériau est chauffé ou refroidi, sa structure, sa composition chimique évoluent. Ces transformations comme la fusion, l'oxydation… se réalisent avec échange de chaleur.

2.3 Rapport de diagnostic

Pour être utile, le rapport de diagnostic doit indiquer, à partir de la synthèse des différents tests effectués :

- l'origine et l'importance des désordres constatés, leur évolution probable ainsi que leur incidence sur l'exploitation de l'ouvrage ;
- les réparations à entreprendre (méthodes applicables) avec leur degré de priorité.

2.4 Projet de réparation

Le projet de réparation constitue le cahier des charges de la réparation à envisager. Il doit :

- définir les objectifs à atteindre (durabilité, aspect…) ;
- préciser les moyens à mettre en œuvre ;
- évaluer le montant des réparations.

Le choix des procédés et des produits de réparation doit être adapté :

- aux défauts constatés (faïençage, fissuration superficielle, écaillage, éclats, épaufrures, fissuration profonde, corrosion des armatures...) ;
- aux contraintes du chantier (contraintes d'exploitation, économiques, environnementales) ;
- aux conditions spécifiques de mise en œuvre des solutions proposées (produits à base de liants hydrauliques, de résine époxydique...) ;
- au support.

2.5 Exécution des travaux

2.5.1 Élimination des zones dégradées ou polluées par des agents agressifs

Il ne faut pas sous-estimer les zones dégradées qui sont constituées de parties visibles, mais aussi de parties paraissant *a priori* saines.

Il existe différentes méthodes d'élimination des bétons dégradés ou des zones polluées citées dans la norme NF P 95-101.

METHODES – MATERIEL	EFFICACITE	INCONVENIENTS
a) Élimination en épaisseur		
Burinage Outils manuels pneumatiques ou électriques légers	Bon dégagement des bétons fissurés brûlés et pollués dans l'encombrement des armatures.	Création de microfissurations locales dans le cas d'abattage sans précaution.
Repiquage Marteau léger pneumatique à aiguilles multiples	Préparation efficace des bétons et surtout des armatures corrodées provoquant leur décollement.	Création de microfissurations dans les granulats du béton.
Bouchardage Outils manuels, pneumatiques ou électriques légers à pointes de diamant	Bonne préparation des surfaces de faible importance.	Microfissurations importantes.
Hydro-décapage	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés.	Risque pour le personnel. À réserver aux produits de réparation adhérant sur surface humide.

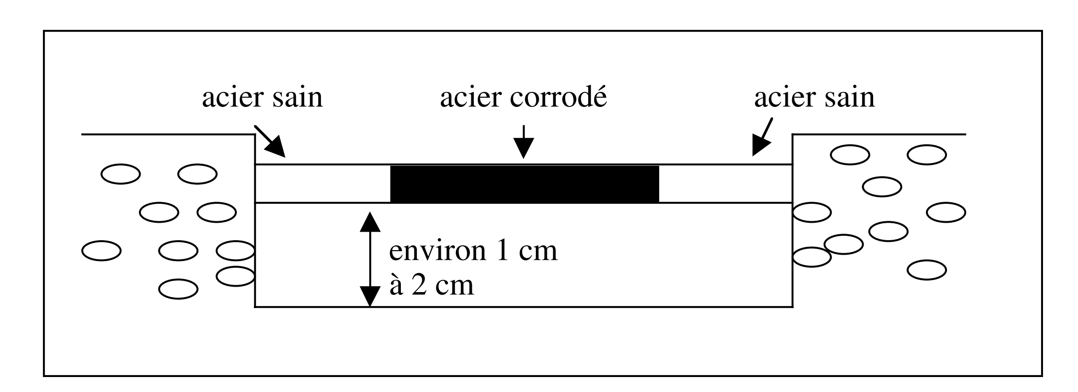
./.

./.

METHODES – MATERIEL	**EFFICACITE**	**INCONVENIENTS**
b) Élimination de surface		
Sablage à sec Sableuse pneumatique et compresseur	Avec sables synthétiques agréés, bonne préparation des bétons et armatures avec utilisation de résine synthétique.	Nuages de poussières. Nécessité d'un personnel qualifié, équipé de protection individuelle agréée. Risque pour ce personnel.
Sablage humide Sableuse pneumatique et compresseur	Avec de la silice pure, bonne préparation des reprises avec liant hydraulique.	Risque important de pollution des parties voisines. Prévoir une protection efficace.
Décapage à l'eau à très haute pression Pompe électrique haute pression	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés.	Risque pour le personnel. À réserver aux produits de réparation adhérant sur surface humide.
Rabotage mécanique Rabot électrique à molettes ou outils multiples	Préparation des surfaces planes horizontales, non armées, fissurées et polluées.	Création d'amorces de fissuration. Prévoir un produit de collage ou un primaire d'accrochage.
Décapage thermique Lance à becs multiples oxyacétyléniques	Préparation des surfaces planes de béton non armé, très efficace en cas de pollution chimique.	Création de fissures dans les granulats du béton. Prévoir un nettoyage final énergique.
Ponçage Ponceuse légère rotative à disques abrasifs	Préparation des surfaces planes de faible importance sans fissure ni armature.	Pas de reprise performante. Risque de polissage de la surface.
c) Décapage chimique		
Par acide dilué ou par solvant	À réserver aux cas particuliers : élimination de la pellicule de surface (peinture) ou de laitance de béton non armé.	Risque important de pollution des parties voisines. Prévoir une protection efficace. Risque de corrosion des armatures.

2.5.2 Réparation des armatures

1. Dégager complètement les armatures corrodées à traiter jusqu'aux aciers sains.



2. Eliminer les parties corrodées sur toute la surface de l'armature par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenaillage.
3. Eliminer toute poussière résiduelle soit à sec, par brossage, aspiration ou soufflage à l'air déshuilé, soit par lavage à l'eau avec ou sans détergent, avec élimination des excès d'eau. Le choix de la technique de nettoyage est fonction des produits de réparation utilisables sur support sec ou humide.

4. Mesurer le diamètre résiduel des armatures corrodées. En fonction des préconisations du diagnostic, mettre en place des armatures supplémentaires par scellement ou soudure pour compenser la réduction des sections des armatures d'origine.
   - armatures non structurelles : on peut admettre localement des dégradations de la section de l'ordre de 20 % ;
   - armatures structurelles : lorsque cette dégradation est supérieure à 10 % de la section, procéder à un remplacement de la zone endommagée. Solutions envisageables :
     - mise en place d'une nouvelle armature de section équivalente avec une longueur d'ancrage égale à 50 fois le diamètre de part et d'autre de la zone renforcée ;
     - soudure d'une nouvelle barre sur la partie saine existante (longueur de soudure : 10 fois le diamètre),
     - utilisation d'un système de manchonnage pour assurer la continuité des armatures,
     - renforcement de la section par collage, sur la peau du béton, d'une bande de renforcement (procédés agréés),
     - en cas d'enrobage insuffisant, mettre en place des armatures en acier galvanisé ou inoxydable ;
   - armatures pour béton précontraint : lorsque la dégradation touche ces armatures il y a lieu de réaliser un diagnostic précis des désordres pour envisager soit une réparation de l'élément, soit son remplacement.
5. Enduire l'armature d'un produit de protection anti-corrosion adapté et compatible avec le produit de réparation.
6. Reconstituer l'enrobage des armatures avec un produit de réparation certifié ou spécifique selon la nature du béton, sa localisation, son traitement de finition et le type de bâtiment (historique ou non). Le produit de réparation doit adhérer parfaitement au support, présenter un faible retrait, une bonne imperméabilité à l'eau et une résistance mécanique comparable à celle du support.
7. Après réparation, l'ensemble de la surface de l'ouvrage peut être traité à l'aide d'un inhibiteur de corrosion qui va renforcer la protection des armatures par action chimique (inhibiteur de type monofluoro-phosphate ou amino-alcool).

   Remarque : d'autres méthodes de protection sont utilisables telles que les procédés électro-chimiques (réalcalinisation, extraction des ions chlorures, protection cathodique).

   Ces procédés sont à mettre en œuvre par des spécialistes.

2.5.3 Choix des produits de réparation

Caractéristiques des produits de réparation

Le produit de réparation utilisé doit posséder vis-à-vis du béton dégradé les qualités suivantes :

- être compatible avec le support, à savoir :
  - un retrait plastique limité pour les liants hydrauliques (retrait apparaissant pendant les premières heures lors de la prise et du durcissement). La présence de fibres de polypropylène permet de répartir la fissuration sous forme de microfissures (des précautions particulières sont à prendre lors de la mise en œuvre : humidification du support, protection contre la dessiccation) ;
  - un retrait hydraulique limité pour les liants hydrauliques de manière à éviter l'apparition de fissures ou de décollement à l'interface produit de réparation/béton restauré ;
  - une adhérence au béton support au moins égale à la résistance en traction du béton restauré ;
  - une adhérence aux armatures métalliques d'origine ou rapportées ;
  - des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaires à celles du béton support ;
  - un module élastique semblable à celui du béton support ;
  - un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.

- présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales :
  - les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont :
    - les chlorures,
    - les sulfates,
    - le gaz carbonique,
    - l'oxygène,
    - l'eau pure ;
  - les deux vecteurs de ces agents agressifs sont l'air et l'eau ;
  - comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de réparation doivent donc présenter une compacité permettant d'obtenir une imperméabilité garante de :
    - la résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion du fait de leur dépassivation. Cette caractéristique est étroitement liée, outre à l'aspect formulation du produit de réparation, à la qualité de sa mise en œuvre, et notamment à la teneur en eau de gâchage et à la mise en place ;
    - la résistance aux sulfates apportés soit par l'eau de mer (ou les embruns), soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse (par exemple le sous-sol parisien) ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver. Dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs (ettringite) entraînant, à terme, la ruine du béton. Il faut tenir compte de cet élément pour la formulation du produit de réparation fabriqué en usine ou sur chantier, en choisissant les ciments adaptés PM (Prise Mer) ou ES (Eaux Séliniteuses) ;
    - la résistance aux chlorures apportés essentiellement par l'eau de mer (ou les embruns) et le sel de déverglaçage. Les chlorures migrant dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures ;
    - la résistance aux cycles de gel/dégel, indispensables dans les environnements subissant ces cycles. Pour les produits de réparation à base de liant hydraulique, la présence d'un adjuvant d'entraîneur d'air est nécessaire.

Les différentes familles de produits de réparation

Il existe trois familles de produits de réparation :

- les mortiers ou bétons à base de liants hydrauliques ;
- les mortiers ou bétons à base de liants hydrauliques modifiés ;
- les mortiers ou bétons à base de résines synthétiques.

Ces produits peuvent être préparés sur chantier ou en usine ; dans ce dernier cas, ils doivent figurer sur la liste des fabrications admises à la marque NF – *Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique* – éditée par L'AFNOR.

Pour les bâtiments classés et ceux figurant à l'Inventaire des monuments historiques, les produits de réparation ne sont pas obligatoirement certifiés ; dans ce cas, la composition est faite par un formulateur. Pour les autres bâtiments, s'orienter de préférence vers des produits de réparation certifiés.

Pour l'ensemble de ces trois familles, la température ambiante d'application doit être comprise entre 5 °C et 30 °C environ ; la température du support béton doit être supérieure ou égale à 5 °C.

a) Mortiers ou bétons à base de liants hydrauliques

Il faut choisir un liant normalisé (ciment et/ou chaux hydraulique) adapté à la fois à l'environnement et au support à réparer, utiliser des granulats d'une granulométrie identique ou similaire à celle du béton d'origine et adaptée à l'épaisseur de la partie à réparer, ainsi que des adjuvants normalisés permettant de respecter le dosage en eau préconisé (adjuvant réducteur d'eau) ou de compenser les aléas liés aux conditions climatiques (adjuvant retardateur ou accélérateur de prise, entraîneur d'air).

Stockage. Les produits et matériaux sont stockés sous abri dans un local aéré non humide et protégé contre les pollutions de toute nature.

Préparation. Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface adaptée permettant de le débarrasser de tout élément non ou peu adhérent. Il doit être notamment exempt de trace d'huile, de graisse, de laitance, de produit de cure et de toute substance susceptible de nuire à l'adhérence. Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe.

- La préparation sur chantier des produits de réparation doit être assurée par des moyens mécaniques adaptés aux volumes unitaires et au cahier des charges. Tout mélange manuel est interdit.
  Le cahier des charges doit définir le rapport eau sur ciment (E/C) qui conditionne la maniabilité souhaitée ainsi que la qualité des réparations.
- Les produits de réparation fabriqués en usine se présentent sous la forme de mortiers prédosés secs auxquels il suffit d'ajouter la quantité d'eau fixée par le fabricant. Parfois, un adjuvant est conditionné séparément en dose précise pour être associé au dernier moment au produit de base.

Toutes les précautions doivent être prises pour assurer une parfaite homogénéité du mélange : respect du dosage en eau, malaxage mécanique, respect du temps de malaxage.

Application. Quels que soient leurs modes de conditionnement et de préparation, les produits sont mis en œuvre dans les délais les plus courts après l'arrêt du malaxage. Le délai dépend de la nature du liant, de la température ambiante et de l'adjonction éventuelle d'un adjuvant.

Afin d'améliorer la liaison entre mortiers ou bétons et support, il peut être nécessaire, sauf s'il s'agit de béton projeté, d'appliquer un produit d'adhérence à base de résine ou de liants hydrauliques modifiés. Les délais prescrits entre l'application du produit d'adhérence et celle des mortiers ou bétons doivent être scrupuleusement respectés. Ces délais sont en général fonction de la température ambiante et de celle du support.

Lors de l'application, le support doit être saturé d'eau. Pour cela, l'arroser abondamment la veille et l'humidifier si nécessaire à nouveau juste avant la mise en œuvre. Veiller cependant à ce qu'il ne reste pas de film ni de flaque d'eau en surface, ce qui pourrait nuire à l'adhérence du mortier.
Par ailleurs, il est nécessaire d'effectuer le serrage du mortier ou du béton sur son support.
Afin d'éviter tout problème lié à la dessiccation, le mortier doit être protégé du gel, du vent et du soleil pendant la prise et le durcissement.

b) Mortiers ou bétons à base de liants hydrauliques modifiés

Il s'agit de mélanges formulés sur chantier ou en usine à base de liants hydrauliques, de granulats, modifiés par l'ajout de résines synthétiques et éventuellement de fibres.
L'addition de résine permet de réduire le rapport eau/ciment. Elle améliore sensiblement les propriétés des mortiers :

- l'adhérence au support ;
- les résistances mécaniques ;
- la résistance à la carbonatation ;
- l'imperméabilité ;
- la plasticité lors de la mise en œuvre.

Stockage. Certains constituants des produits à basse de liants hydrauliques modifiés sont sensibles aux températures externes et à l'humidité. Les conditions de stockage sont précisées par les fabricants sur les emballages et dans les notices : elles doivent être impérativement respectées.

Préparation. Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface adaptée permettant de le débarrasser de tout élément non ou peu adhérent. Il doit être notamment exempt de trace d'huile, de graisse, de laitance, de produit de cure et de toute substance susceptible de nuire à l'adhérence. Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe.

Au moment de la préparation, le prémélange est gâché avec un liquide dans des proportions définies par le fabricant. Ce liquide peut être soit de l'eau, soit un liquide spécial prédosé par le fabricant. Le mode d'emploi du fabricant doit être respecté, en particulier l'ordre de mélange des constituants. Lorsque le liquide à ajouter est de l'eau, la quantité doit être mesurée avec des récipients étalonnés.

Application. Le matériel et les temps de malaxage doivent être ceux préconisés par le fabricant ou le cahier des charges. Afin d'améliorer la liaison entre mortier et support, il peut être préconisé d'appliquer un produit d'adhérence à base de liant hydraulique modifié, sauf s'il s'agit de béton projeté.

Lors de l'application, le support doit être saturé d'eau. Pour cela, l'arroser abondamment la veille et l'humidifier si nécessaire à nouveau juste avant la mise en œuvre. Veiller cependant à ce qu'il ne reste pas de film ni de flaque d'eau en surface, ce qui pourrait nuire à l'adhérence du mortier.

Par ailleurs, il est nécessaire d'effectuer le serrage du mortier ou du béton sur son support.Afin d'éviter tout problème lié à la dessiccation, le mortier doit être protégé du gel, du vent et du soleil pendant la prise et le durcissement.

c) Mortiers ou bétons à base de résines synthétiques

Ces mortiers sont essentiellement utilisés lorsqu'il faut obtenir de hautes résistances mécaniques et chimiques dans un délai très court. En revanche, le coefficient de dilatation de ces produits est supérieur à celui du béton : il faut donc éviter leur application dans les ouvrages où le risque de choc thermique est important.

Le liant est constitué de résine thermodurcissable comme les résines époxydiques.

Les mortiers à base de liants synthétiques se caractérisent par :

- une excellente adhérence au support béton ou acier ;
- un durcissement rapide ;
- une imperméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau ;
- de très hautes résistances mécaniques avec une montée en résistance rapide.

Stockage. Le stockage des produits doit se faire dans l'emballage d'origine, dans un endroit protégé, sec et à la température préconisée par le fabricant.

Préparation. Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface adaptée permettant de le débarrasser de toute partie non ou peu adhérente. Il doit être notamment exempt de trace d'huile, de graisse, de laitance, de produit de cure et de toute substance susceptible de nuire à l'adhérence. Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe. Le support doit être parfaitement sec, sauf si la résine est compatible avec une surface humide.

Une couche primaire d'adhérence peut être nécessaire selon les produits.

Le mode d'emploi du fabricant doit être scrupuleusement suivi. Il doit définir :

- le choix du matériel de malaxage,
- un éventuel prémalaxage à sec,

- l'ordre de mélange des composants des résines synthétiques,
- le temps de malaxage pour une parfaite homogénéité du mélange,
- l'éventuelle nécessité de nettoyage, après chaque gâchée, du matériel et des récipients.

D'une façon générale, tout mélange de gâchées différentes doit être proscrit.

Application. Le mode d'emploi du fabricant doit donner la durée pratique d'utilisation des produits en fonction de la nature de la résine, des dosages utilisés, des quantités préparées et de la température.

Le programme de mise en œuvre doit tenir compte de la température ambiante, de celle des composants et de celle du support.

Lors de la mise en place dans le coffrage, il faut s'assurer que la résine (composant du mélange) n'adhère pas à ce coffrage et prendre, si nécessaire, les mesures adéquates, par exemple en enduisant le coffrage d'un film isolant.

2.5.4 Technique de mise en place des produits de réparation

Quelles que soient la nature et la quantité de produit de réparation, le mélange doit être parfaitement homogène avant son application. Pour les produits de réparation fabriqués en usine, se reporter aux notices techniques du fabricant.

Suivant le type des désordres à réparer, il existe différentes techniques d'application des produits de réparation :

- à la truelle pour les petites surfaces,
- au pot à projeter,
- à la machine à projeter pour les grandes surfaces (par voie sèche [gunitage] ou par voie humide).

Pour les fissures profondes et ouvertes, la technique de l'injection est utilisée.

2.5.5 Aspect de parement

La discrétion de la réparation tient à plusieurs facteurs dont il faut tenir compte à l'avance :

- La teinte du produit adopté : la coloration ne sera jamais la même, mais elle doit s'en rapprocher.
- La granulométrie du parement : on doit mélanger le produit avec des granulats identiques au béton d'origine pour constituer un ragréage de parement.
- L'empreinte du coffrage : les traces de palplanches peuvent être imitées ou reprises en moulage.
- Les raccords avec l'existant : enfin les raccords sur existants peuvent être franchement arrêtés suivant un dessin à préciser, ou au contraire sans limite apparente et en dégradé.

Très visible au début, la réparation doit pouvoir se fondre progressivement dans le parement.

2.6 Synthèse des techniques de réparation des bétons

TRAITEMENTS DESORDRES	LAVAGE	DECAPAGE	PURGE DU BETON	REPARATION
Bullage	Elimination des salissures et particules non adhérentes.			Ragréer éventuellement la surface avec un produit adapté (couleur, anti-retrait...)
Nids de cailloux	*Dito.*		Suivant l'importance de la zone concernée, burinage ou repiquage du « mauvais » béton	Reprendre au mortier de réparation. Traiter éventuellement les armatures corrodées.
Spectre des armatures	*Dito.*	Si l'enrobage des armatures est correct, ce problème est principalement esthétique. Dans ce cas un léger sablage humide estompera la présence du spectre.		Si le spectre est dû au mauvais enrobage des armatures, protéger impérativement par une étanchéité.
Aspect grenu	*Dito.*	Si l'attaque est un peu profonde (déchaussement du sable), décaper la surface par bouchardage ou grenaillage.		Protéger éventuellement la surface bouchardée à l'aide d'un hydrofuge.
Écaillage	*Dito.*		Suivant l'importance de la zone concernée, burinage ou repiquage du « mauvais » béton en dégageant les armatures corrodées.	Traiter les armatures éventuellement corrodées. Reprendre au mortier de réparation. Traiter éventuellement avec un hydrofuge.
Épaufrures	*Dito.*		Suivant l'importance de l'épaufrure, burinage ou repiquage de la zone endommagée en dégageant les armatures éventuellement corrodées.	Traiter les armatures éventuellement corrodées. Reprendre au mortier de réparation. Ajouter un complément d'armatures suivant l'importance de la réparation.
Fissures	*Dito.*		Pour les fissures avec infiltration d'eau, ouvrir la fissure et évacuer les parties non adhérentes. Pour les fissures avec corrosion des armatures Dans les deux cas vérifier qu'il ne s'agit pas d'une fissure structurelle.	Traiter la fissure ouverte avec un joint souple étanche. Se reporter aux épaufrures. Pour les fissures structurelles Faire une injection dans la fissure et renforcer si nécessaire la structure par collage de bandes de renforcement en inox ou en fibres de carbone. **Travaux sont réalisés par une entreprise spécialisée**.

./.

./.

TRAITEMENTS DESORDRES	LAVAGE	DECAPAGE	PURGE DU BETON	REPARATION
Concrétions	Pour les concrétions peu adhérentes, lavage à l'eau sous haute pression.	Dans le cas d'adhérences plus importantes, décapage par sablage humide.		Étancher le béton en éliminant l'origine des pénétrations d'eau.
Efflorescences	Pour les cristallisations peu adhérentes, lavage à l'eau et brossage. Pour les cristallisations plus adhérentes, lavage à l'eau additionnée d'acide chlorhydrique (dilution 5%) suivi d'un rinçage à l'eau abondant. Renouveler l'opération si nécessaire.	Pour les efflorescences sous forme de cristaux solides, voir le problème des concrétions.		Laisser « respirer le béton » pendant quelques semaines avant d'appliquer un hydrofuge.
Salissures (voir *Protection et entretien des bétons*)	Lavage à l'eau sous haute pression éventuellement additionnée d'un détergent adapté. Brossage et rinçage.	Gommage de la surface pour les salissures les plus ancrées.		Protéger les surfaces par un hydrofuge d'imprégnation.

3 LES DIX COMMANDEMENTS POUR LA REPARATION DES BETONS

1. FAIRE UN POINT SUR L'ETAT DE L'OUVRAGE.	Cette étape consiste à réaliser une évaluation de l'état de l'ouvrage existant à partir : - de documents retraçant l'historique du bâtiment ; - d'observations visuelles et d'analyses *in situ* ou/et en laboratoire permettant d'apprécier l'étendue des dégradations. Des précautions concernant la sécurité seront éventuellement prises en fonction de l'état de l'ouvrage afin d'éviter tout risque d'accident.
2. IDENTIFIER LES CAUSES DES DEGRADATIONS	Les causes des dégradations seront identifiées selon : - leur nature : chimique, physique ou mécanique ; - leur origine : erreurs de dimensionnement ou de conception et de réalisation, problèmes liés à la mise en place, exploitation inadaptée de l'ouvrage. Il faudra distinguer les causes qui génèrent des dégradations non évolutives, et celles qui génèrent des dégradations évolutives dans le temps.
3. ESTIMER L'EVOLUTION PROBABLE DES DEGRADATIONS	A partir de l'identification des causes de dégradations établie précédemment, il est possible de prévoir leur évolution au moins sur le court terme et, ainsi, d'estimer la durée de vie de l'ouvrage sans intervention.
4. FIXER LES OBJECTIFS D'INTERVENTION	A ce stade, à partir des analyses réalisées précédemment et d'expériences vécues antérieurement sur d'autres ouvrages par la maîtrise d'œuvre (l'architecte, le bureau d'étude ou l'expert), il est possible de définir précisément les objectifs d'intervention, c'est-à-dire, soit : - ne réaliser aucune intervention ; - réaliser une protection qui stabilisera l'ouvrage dans l'état où il se trouve ; - effectuer des réparations pour éliminer et remédier aux dégradations constatées ; - effectuer des travaux de renforcement structuraux si l'état de l'ouvrage le justifie.
5. PRENDRE EN COMPTE LES EXIGENCES DU MAITRE D'OUVRAGE	Le maître d'ouvrage choisira en fonction de critères économiques, historiques, esthétiques, de sécurité, etc. l'un des objectifs d'intervention proposés.
6. ETABLIR UN PLAN D'INTERVENTION	Le maître d'ouvrage ayant clairement choisi ses objectifs d'intervention et fixé ses exigences, le maître d'œuvre peut maintenant définir un plan d'intervention. C'est à ce stade que sont choisies les méthodes ainsi que les produits de réparation et/ou de protection.
7. REDIGER UN CAHIER DES CHARGES	Ce document contiendra la description des opérations à réaliser selon la logique propre au chantier considéré. Il proposera un planning précis prenant en compte à la fois : - les accès, l'environnement et l'installation du chantier, - les travaux préparatoires, - les mesures de sécurité, - ainsi que la séquence des phases d'intervention.
8. SELECTIONNER LES INTERVENANTS	Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre étudieront et compareront les réponses aux appels d'offre proposées par les entreprises, ainsi que les PAQ.
9. REALISER UN CONTROLE PENDANT LES TRAVAUX	La maîtrise d'œuvre, l'organisme de contrôle suivront régulièrement l'avancement des travaux et signaleront les éventuelles non-conformités.
10. RECEPTIONNER LES TRAVAUX	Vérifier la conformité des travaux selon le cahier des charges. Etablir un plan de suivi régulier.

BIBLIOGRAPHIE : Normes – Fascicules – Documents divers

Constituants

- NF EN 197-1 (février 2001) – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- NF P 15-317 (septembre 1995) – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
- XP P 15-319 (septembre 1995) – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à hautes teneurs en sulfates
- NF EN 459-1 (octobre 2002) – Chaux de construction – Définitions, spécifications et critères de conformité.
- NF EN 934-2 (avril 1998) – Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 – Adjuvants pour bétons.
- NF EN 932-3 (décembre 1996) – Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 3 : Procédure et terminologie pour la description pétrographique simplifiée.
- XP P 18-576 (décembre 1990) – Granulats – Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- XP P 18-593 (décembre 1990) – Granulats – Sensibilité au gel.
- FD P 18-542 (mai 1994) – Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques – Critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction (fascicule de documentation).
- NF EN 1008 (juillet 2003) – Eau de gâchage pour bétons.

Béton

- NF EN 206-1 (février 2002) – Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.
- Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (juin 1994) et document annexe Guide pour l'élaboration du dossier carrière – Circulaire du 24 janvier 1995.
- Guide pour la rédaction des pièces écrites des marchés – Prévention des désordres dus à l'alcali-réaction SETRA (juin 1996).
- XP P 18-420 (juin 1995) – Bétons – Essais d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
- P 18-424 (octobre 1994) – Bétons – Essais de gel sur béton durci – Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau.
- P 18-425 (octobre 1994) – Bétons – Essais de gel sur béton durci – Gel dans l'air – Dégel dans l'eau.
- FD P 18-011 (juin 1992) – Bétons – Classification des environnements agressifs (fascicule de documentation).
- NF EN 12-696 (juillet 2000) – Protection cathodique de l'acier dans le béton (A05-668).
- La surveillance et l'entretien des ouvrages d'art communaux (publié dans *Démocratie locale*, supplément au n° 18 de mars 1981) Ministère Intérieur/Équipement.
- Mode opératoire AFREM pour mesurer les concentrations en chlorures.
- DTU 21 (NF P 18-201) – Travaux de bâtiment – Exécution des travaux en béton – CCT.
- DTU 23.1 (NF P 18-210) – Travaux de bâtiment – Murs en béton banché CCT.
- DTU 22.1 (NF P 10-210) – Travaux de bâtiment – Murs extérieurs en panneaux préfabriqués de grandes dimensions du type plaque pleine ou nervurée en béton ordinaire – Cahier des charges.
- DTU P 18-702 (février 1999) – Règles BAEL 91 révisées 99 – Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- DTU P 18-702/A1 (février 2000) – Règles BAEL 91 révisées 99 – Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites – Modificatif n° 1.
- NF P 95-101 (novembre 1993) – Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages d'art en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.

- NF P 95-102 (avril 2002) – Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.
- NF P 95-103 (juin 1993) – Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.
- NF P 95-104 (décembre 1992) – Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de la précontrainte additionnelle.
- NF P 95-106 (août 1993) – Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives aux fondations des ouvrages.

Produits de réparation

- XP P 18-840 (septembre 1993) – Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Caractères normalisés garantis.
- PR NF EN 1504-3 (juin 2001) – Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : réparation structurale et réparation non structurale.
- PR NF EN 1504-10 (octobre 1999) – Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux (P 901-10).
- Réparation des parements en béton : Produits et techniques actuels (note technique 1985) LCPC.
- Guide technique « Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton » LCPC SETRA.
- Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton – Guide technique (août 1996) LCPC/SETRA.
- Réparation des structures en béton fissuré par injections de liants époxydiques (1979) LCPC.
- Liste AFNOR : certification des fabrications admises à la marque NF – Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique.